

# **Universidad de Cuenca**



## **Facultad de Ciencias Químicas Escuela de Ingeniería Industrial**

### **MODALIDAD DE TITULACIÓN: ENSAYO ACADÉMICO**

### **“ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL CEMENTO POR EL MÉTODO DE GRANULOMETRÍA LÁSER Y SU RELACIÓN CON LAS RESISTENCIAS A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS UNIVERSALES”**

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO  
A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERA INDUSTRIAL

#### **AUTORA:**

CINTHIA ESTEFANÍA MUÑOZ GÁRATE

C.I: 0302619853

#### **DIRECTOR Y CO-AUTOR:**

DR. CHRISTIAN AMÉRICO CRUZAT CONTRERAS

C.I: 0107985681

**CUENCA-ECUADOR**

**2017**



## Resumen

El presente estudio tuvo por propósito analizar la incidencia de la distribución del tamaño de partículas del cemento, en condiciones diferentes de operación del molino de cemento y su relación con las resistencias mecánicas del mismo en diferentes días, aplicando la técnica de granulometría mediante difracción láser. Para ello se ha realizado un estudio observacional de carácter longitudinal a 28 muestras, producto de 28 modificaciones de la velocidad de separador de aire y del variador de velocidad del molino de cemento en la Planta Guapán perteneciente a la Unión Cementera Nacional ubicada en la Parroquia Guapán del Cantón Azogues. Las muestras fueron analizadas en un granulómetro laser Masterziser 3000 para obtener la distribución de las partículas, por otro lado se realizaron pruebas de resistencia para cada muestra en los lapsos de 1, 3, 7 y 28 días cumpliendo con la norma NTE INEN 488:2009. Se encontraron dos resultados, el primero demostró que el análisis de distribución del tamaño de partículas analizadas mediante la función granulométrica de Rossin Rammler no está correlacionado con las propiedades mecánicas del cemento, mientras que, el segundo muestra que al imprimir mayor velocidad en el separador de aire y en el variador de velocidad las propiedades mecánicas del cemento aumentaron dando como resultado una correlación significativa de 0,394 ( $p < 0,05$ ), según la prueba paramétrica denominada Coeficiente de correlación de Pearson.

**Palabras clave:** - granulometría láser, Rossin Rammler, propiedades mecánicas del cemento, separador de aire, variador de velocidad



### **Abstract**

The aim of the present study was to analyze the incidence of cement particle size distribution under different conditions of operation of the cement mill and its relationship with the mechanical strength through different days, applying the granulometry technique by using laser diffraction. For this purpose, an observational longitudinal study was carried out on 28 samples, as a result of 28 modifications of the air separator speed (G35) and speed variator (G39) of the cement mill at the Planta Guapán which belongs to Unión Cementera Nacional located in the Guapán Parish of the Azogues Canton. Samples were analyzed on a Masterziser 3000 laser granulometer to obtain particle distribution; on the other hand, resistance tests were performed for each sample in the lapses of 1, 3, 7 and 28 days, meeting the NTE INEN 488: 2009 standard. Two results were found, the first one showed that the particle size distribution analysis tested by the Rossin Rammler granulometric function is not correlated to the mechanical properties of the cement, while the second shows that when increasing the speed of the air separator and speed variator, the mechanical properties of the cement enhanced, resulting in a significant correlation of 0.394 ( $p < 0.05$ ), according to the parametric test Pearson Correlation Coefficient.

**Keywords:** laser grading, Rossin Rammler, mechanical properties of cement, air separator, speed variator.



## Índice de Contenido

Resumen .....	2
Abstract.....	3
Índice de Contenido.....	4
Índice de tablas .....	4
Índice de figuras .....	5
CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR .....	6
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL.....	7
Introducción.....	8
Materiales y métodos.....	22
Materiales .....	22
Recopilación de datos .....	23
Resultados.....	27
Rosin Rammler (R-R).....	27
Correlación .....	27
Discusión .....	32
Conclusiones.....	33
Bibliografía.....	34

## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Velocidades de G35 Y G39 empleadas en el experimento .....	23
<b>Tabla 2.</b> <i>Calculo de la tabla de flujo en morteros</i> .....	26
<b>Tabla 3.</b> Resultados de Tabla de Flujos .....	26
<b>Tabla 4.</b> Resultados obtenidos por cada muestra.....	28
<b>Tabla 5.</b> Correlación entre tamaño de partículas y velocidad de operación del molino con la resistencia del cemento .....	32



### Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Principio de funcionamiento de granulometría.....	18
<b>Figura 2.</b> Ensayo de resistencia mecánica .....	25
<b>Figura 3.</b> Resistencia en MPA de acuerdo a XR Muestras C4a, C18c y C17c .....	30
<b>Figura 4.</b> Resistencia en MPA de acuerdo a XR Muestras C5a, C8b y C24d.....	31

### Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 1.</b> Función de Distribución Gates-Gaudin-Schumann.....	15
<b>Ecuación 2.</b> Función de Distribución de Rosin-Rammler .....	16
<b>Ecuación 3.</b> Coeficiente r de Pearson .....	27



## CLÁUSULA DE DERECHOS DE AUTOR



Universidad de Cuenca  
Cláusula de derechos de autor

*Cynthia Estefanía Muñoz Gárate*, autora del ensayo académico "ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL CEMENTO POR EL MÉTODO DE GRANULOMETRÍA LÁSER Y SU RELACIÓN CON LAS RESISTENCIAS A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS UNIVERSALES", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniera Industrial. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora

Cuenca, 09 de febrero del 2017

Cynthia Estefanía Muñoz Gárate

C.I: 0302619853



## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca  
Cláusula de propiedad intelectual

Cynthia Estefanía Muñoz Gárate, autora del ensayo académico "ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL CEMENTO POR EL MÉTODO DE GRANULOMETRÍA LÁSER Y SU RELACIÓN CON LAS RESISTENCIAS A TRAVÉS DE LOS ENSAYOS UNIVERSALES", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 09 de febrero del 2017

Cynthia Estefanía Muñoz Gárate

C.I.: 0302619853



## Introducción

El albañil inglés Joseph Aspdin, a principios del siglo XIX, fue el primero en hacer cemento Portland a partir de la quema de polvo de piedra caliza y arcilla en la estufa de su cocina (Lesley, 1898). Con este método sentó las bases para una industria que anualmente convierte montañas de piedra caliza, arcilla, en roca de cemento y otros materiales de polvo tan fino, capaces de pasar a través de un tamiz.

El cemento Portland es el ingrediente básico del hormigón. El hormigón se forma cuando el cemento Portland crea una pasta con agua, que se une con la arena y la roca hasta endurecerse. Esta pasta acuosa se fabrica a través de una combinación química estrechamente controlada de calcio, silicio, aluminio, hierro y otros ingredientes.

Los materiales comúnmente utilizados para la fabricación de cemento incluyen piedra caliza, conchas, y margas tiza, combinado con pizarra, arcilla, escoria de alto horno, arena de sílice y el mineral de hierro. La piedra caliza es una piedra rica de origen sedimentario, en cuya composición interviene mayoritariamente el carbonato de calcio, aunque también es posible que participe en menor medida otros minerales como los que componen a la arcilla (Trujillo, 2014). La marga es una roca natural de construcción intermedia entre las calizas puras (Antuña, 2009). La pizarra, por su parte, es una roca homogénea, de grano muy fino, comúnmente de color negro azulado, opaca, firme y que se divide con facilidad en hojas planas y delgadas (Antuña, 2009). Las escorias de alto horno son subproductos de la siderurgia y metalurgia, cuya composición fisicoquímica depende del mineral usado y de la tecnología empleada (Castells, 2000). La arena de sílice, a su vez, es el resultante de la desintegración de las rocas por periodos de tiempo muy largos (Kalpakjian & Schmid, 2002).

Cuando, los ingredientes anteriormente mencionados, se calientan a altas temperaturas, forman una sustancia como una roca, que llega a ser molida en polvo fino al que se le denomina cemento (García, Sánchez, Frías, & Mújika, 2006) (PCA, 2012). En los laboratorios de control en las plantas de cemento comprueban cada paso en la fabricación de cemento Portland a través de frecuentes pruebas químicas y físicas, entre las cuales se destacan las pruebas de resistencia a la compresión y tiempos de fraguado que son las pruebas que constituyen los indicadores de calidad del cemento obtenido.





También analizan y ponen a prueba el producto terminado para asegurar que cumpla con todas las normativas de la industria.

Los diferentes métodos que se emplean para la elaboración del cemento Portland, una vez que el crudo se encuentra homogeneizado, son los que se detallan a continuación:

1. Por proceso de vía húmeda; el cual permite un manejo y homogeneización más fácil de las materias primas, particularmente en aquellos casos en que se encuentran húmedas o pegajosas o en las que las materias primas exhibían grandes fluctuaciones en su composición química. En este proceso, se prepara una papilla (agua + materias primas finamente molidas), que son bombeadas a un horno rotatorio de gran longitud, donde ocurre todo el piroprocesamiento.
2. Vía semi-seca o proceso Lepol: El crudo se noduliza en un plato granulador. Los nódulos se almacenan en una parrilla donde son secados, precalentados y calcinados parcialmente, haciendo uso de los gases de salida del horno rotatorio.
3. Vía semi-húmeda: A la papilla se le elimina agua mediante filtros prensa. Las tortas que salen de los filtros se transforman en pelets que se introducen en una parrilla o, en su defecto, son enviados a un depósito intermedio previo a ser alimentados a trituradoras-secadoras que generan un crudo seco.

El cemento Portland que se utilizó para este trabajo se fabrica a través de un método en seco. El primer paso consiste en extraer de canteras las principales materias primas, principalmente piedra caliza, arcilla y otros materiales. Después de esto la roca se tritura, lo que implica varias etapas. La primera trituración reduce la roca (la que posee unas dimensiones variadas) a un tamaño máximo de aproximadamente 6 pulgadas. La roca entonces es conducida a unas trituradoras o molinos de martillos secundarios (PCA, 2012), donde se reduce a cerca de 3 pulgadas o menos. La roca triturada se combina con otros ingredientes, tales como mineral de hierro, ceniza volante y tierra, y se introduce en unos enormes hornos rotativos donde se calientan a unos 2700 grados Fahrenheit (Sánchez D. , 2001). Los hornos son, a menudo, de 12 pies de diámetro y están montados con el eje ligeramente inclinado con respecto a la horizontal (PCA, 2012).



La materia prima finamente molida ingresa al horno en el extremo superior. En el extremo inferior hay una ráfaga de fuego crepitante, producida por la quema controlada de carbón en polvo, aceite, combustibles alternativos y gas a tiro forzado. El material se mueve a través del horno y ciertos elementos son impulsados al exterior en forma de gases. El resto de elementos se une para formar una nueva sustancia llamada *clinker*, la que sale del horno en forma de bolas de color gris. El clinker se descarga a temperaturas muy elevadas desde el extremo inferior del horno y es reducido a una temperatura que permita su manipulación por medio de diversos tipos de refrigerantes. El aire caliente de los refrigerantes es devuelto a los hornos, ahorrándose combustible y aumentando la eficiencia del proceso. Después de enfriarse el clinker, las plantas de cemento lo muelen y mezclan con pequeñas cantidades de yeso y caliza. El cemento es tan fino que 1 libra de cemento contiene 150 mil millones de granos, siendo el tamaño de cada grano de 6 a 25  $\mu\text{m}$ . (Bermeo, 2014). El cemento, finalmente, está listo para el transporte a las empresas de concreto premezclado para ser utilizado en una variedad de proyectos. Aunque el proceso seco es la forma más moderna y popular para la fabricación de cemento, algunos hornos en los Estados Unidos utilizan un proceso húmedo (Kalpakjian & Schmid, 2002).

Es importante señalar que desde una perspectiva fisicoquímica y en razón de su alta saturación en cal, se considera al cemento Portland como el que posee un mayor contenido de energía en estado latente a la hora de la hidratación, presentando las siguientes desventajas: a) Libera gran cantidad de hidróxido cálcico, elevando el PH en la pasta y provocando inestabilidad con respecto al medio circundante; b) las reacciones de hidratación se caracterizan por ser fuertemente exotérmicas, existiendo peligro de contracciones y fisuras, c) existe la posibilidad de que los aluminatos cálcicos (tercer componente principal de los cementos Portland) tenga una reacción de tipo expansiva con los sulfatos del medio, lo que ocurre debido a la primera desventaja referida, esto es, el elevado pH (Santamaría, 1983).

Cada una de estas desventajas llevó a que se estudien cementos que provoquen estabilidad, durabilidad en la pasta endurecida y que mejoren la calidad ya poseída por el cemento Portland.

Es así que los compuestos cementantes, que consisten en la sustitución parcial del cemento por otros minerales o productos industriales, se constituyen en una alternativa



sostenible, pues se basan en la incorporación de dos o más adiciones, con el fin de alcanzar mejores propiedades finales gracias a los efectos sinérgicos de sus componentes (Díaz, Izquierdo, Mejía, & Gordillo, 2013). El empleo de cementos compuestos en hormigones, no modifica de manera significativa el tiempo de fraguado, aunque disminuye la exudación y manifiesta un mejor comportamiento mecánico que los hormigones elaborados con cemento Portland sin adición (Menendez, Bonavetti, & Irassar, 2006) (Carrasco, Bonavetti, Menéndez, & Irassar, 2005).

Por su parte, el cemento Portland puzolánico se puede obtener a través de la inter-molienda de las cantidades predeterminadas de clinker de cemento Portland puzolánico (15 a 35 por ciento en masa de cemento portland puzolánico) con pequeñas cantidades de yeso. Mientras que la inter-molienda de dos materiales no presenta ninguna dificultad, cuando se realiza la mezcla de polvos secos es extremadamente difícil. Es común que se recurra a la mezcla sólo cuando las técnicas de inter-molienda resulten antieconómicas y siempre y cuando, la maquinaria necesaria para asegurar la homogeneidad o uniformidad de la producción esté disponible. Si la mezcla no es uniforme se reflejará en las pruebas de rendimiento.

Como ventajas del cemento Portland puzolánico están el hecho que produce menos calor de hidratación y ofrece una mayor resistencia al ataque de los sulfatos y a la penetración de iones cloruro debido a las impurezas en el agua, en comparación al cemento Portland normal. Por lo tanto, puede ser utilizado convenientemente en alcantarillas y en obras de eliminación de aguas residuales. Así mismo, es particularmente útil en construcciones marinas e hidráulicas y en otras estructuras de hormigón como presas y pilares de puentes (Gambhir, 2013). Aunque puede tener una menor resistencia que el cemento Portland ordinario, al momento en que la puzolana se selecciona con cuidado y se refina con el clinker de cemento Portland, bajo condiciones controladas, las resistencias a la compresión alcanzadas son comparables a las del cemento Portland ordinario (Punmia, Kumar, & Kumar, 2007) (Trochez, Agredo, & de Gutiérrez, 2010).

A su vez, los análisis químicos de las puzolanas, tanto de las formulaciones naturales, como los artificiales, permiten observar que estos materiales presentan un fuerte carácter ácido, en el que predominan el sílice, la alúmina y el óxido de hierro. La



suma ponderal suele superar el 70% y a su vez, predomina el sílice, que en ciertos casos excepcionales, llegando a representar el 90% del producto (Santamaría, 1983).

Sintetizando las propiedades de los cementos puzolánicos se destacan las siguientes:

- El calor que se genera durante la hidratación de un cemento puzolánico se reducirá a una cantidad proporcional a la puzolana que se añade. Como consecuencia de esta propiedad, se reduce la tendencia a la fisuración de origen térmico.
- Aumenta la resistencia química a ambientes agresivos como la cal liberada y los aluminatos.
- La presencia de puzolana en el cemento Portland actúa como un inerte, no nocivo a través de un endurecimiento más lento que el Portland base, para posteriormente aparecer como un componente activo, cuyos óxidos y ácidos se combinan de manera gradual con la cal liberada durante la hidratación de los silicatos de Portland, lo que promueve la formación de nuevos compuestos hidráulicos estables (Santamaría, 1983).

Por su parte, la Compañía de Economía Mixta, “Unión Cementera nacional, UCEM C.E.M.”, se originó de la fusión de las compañías Industrias Guapán S.A. y Cementos Chimborazo C.A. con la finalidad de fortalecer la industria cementera nacional y reflejar en el mercado una mayor capacidad de producción y ventas (Empresa Pública Cementera, 2016). La “Planta Industrial Guapán”, antes llamada “Compañía Industrias Guapán”, produce el cemento Portland Puzolánico Tipo IP y cuenta con una planta de hormigón con una capacidad de 60m<sup>3</sup>/hora, con la que se abastece la demanda de las provincias del Azuay y Cañar. La empresa dispone de 12 mixers con capacidades entre 7 m<sup>3</sup> y 11 m<sup>3</sup>, lo que permite abastecer a proyectos de gran volumen de manera continua, y posee un laboratorio de análisis de muestras con certificación INEN (Industrias Guapán, 2016).

En la Compañía Industrias Guapán, el proceso de fabricación de cemento es realizado vía seca (Ruiz, 2009) y corresponde a una secuencia continua de producción dividida en siete etapas:



1. Trituración: El proceso industrial se inicia con la reducción del tamaño de la materia prima procedente de las canteras, teniendo en la entrada rocas con dimensiones de aproximadamente 1000 mm de diámetro y en la salida, partículas en un 95% menores, con un diámetro promedio de 25 mm.
2. Pre-homogeneización: Es el área destinada a la pre-homogeneización y almacenamiento del material triturado previo a la dosificación y molienda del crudo. Se lleva a efecto en esta área el acopio en tres pilas de 7000 toneladas cada una y luego la recuperación a través de un sistema de rastrillo y transporte.
3. Molienda de Crudo: En este sitio se dosifica y prepara la materia prima de acuerdo a los requerimientos físico-químicos para la elaboración del clinker de cemento. Se realiza la molienda hasta una finura tal que el retenido en el tamiz 200 ASTM (75 micras) sea menor al 15% y con una humedad del producto inferior al 0,8%.
4. Homogeneización: Tiene la función de completar la mezcla de la harina cruda para mejorar la homogeneidad del material. Este trabajo se lo realiza mediante la inyección de aire comprimido a impulsos para generar un movimiento interno del polvo. Se dispone de dos silos de homogeneización de 1000 toneladas cada uno y dos silos de almacenamiento de 2000 toneladas cada uno.
5. Clinkerización y Enfriamiento: La harina cruda homogeneizada reacciona químicamente a temperaturas entre 300 y 1500 grados centígrados para dar lugar a la formación del clinker de cemento. Este proceso se realiza introduciendo el material en hornos rotatorios.
6. Molienda de cemento: Una vez obtenido el clinker, se mezcla con diferentes compuestos y se realiza la molienda o acabado del cemento, que constituye la parte final del proceso de fabricación. En esta área se dosifican y muelen el clinker, yeso y puzolana para producir el cemento de acuerdo a las especificaciones contempladas en la Norma INEN 490. El equipo principal empleado es un molino de bolas, marca Fuller, con un diámetro de 3,66 y una longitud total de 11,28 m, de tipo horizontal y dividido en dos cámaras: la primera de 3,66m de longitud, en la que se efectúa la molienda gruesa; la segunda cámara de 7,62m donde se efectúa la molienda final. El molino posee un diseño con descarga axial y es accionado por un motor eléctrico de 3000 HP con una garantía de producción de 60 TMPH de cemento, con una superficie



específica media de  $4300 \text{ cm}^2 / \text{g}$ . La clasificación del producto se logra a través de un circuito dinámico, con un separador de partículas por aire marca F.L. Smidth, modelo OSEPA (Delgado & Negrete, 2012). Durante la molienda del cemento las fracciones más finas del producto son enriquecidas con los componentes de molienda más fácil y rápida, en razón de que estos son más blandos; así ocurre con el yeso y con las cenizas volantes añadidas. Por su parte, las escorias de alto horno se concentran en las fracciones más gruesas (Labahn & Kohlhaas, 1985). Entre las variables que intervienen en este proceso están: la velocidad de separador de aire (G35), la apertura de dâmpper (G24) y el variador de velocidad (G39). Los separadores de aire son responsables de dispersar las partículas por el aire a través de un sistema de plato giratorio y cuyo funcionamiento está basado en una corriente de aire que es proporcional al cuadrado de la dimensión media de una partícula, siendo la fuerza de la gravedad que es ejercida sobre una partícula, proporcional al volumen. Por su parte, el dâmpper sirve para regular la salida de material fino que proviene de la molienda o, en su defecto, el flujo de material fino que proviene del separador de alta frecuencia. Al momento en que se disminuye la velocidad del variador de velocidad habrá mayor caída de material grueso que contiene mayor cantidad de material fino (Chiriboga, 2012).

7. Empaque y Despacho del Cemento: Para la venta de cemento a los consumidores, se dispone de un área totalmente moderna en la que se encuentran instaladas dos ensacadoras rotativas con capacidad de enfundar 2000 sacos de 50 kg, cada una por hora. Además, de un silo metálico para despacho a granel con una capacidad de 1.000 toneladas métricas (Ruiz, 2009).

Una vez que se han descrito las secuencias desarrolladas por la Compañía Industrias Guapán para la elaboración del cemento se observa que es necesario controlar y manejar todos los procesos granulométricos.

La granulometría, por su parte, se define como la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de un suelo, expresado como un porcentaje en relación al peso total de la muestra seca (Sánchez, 2014) Es un instrumento importante en la clasificación de los materiales y la norma ASTM C 136, define la granulometría como



la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado determinado por análisis de tamices.

El tamaño de partícula del agregado tradicionalmente por medio de tamices de malla de alambre con aberturas cuadradas. Los siete tamices estándar ASTM C 33 para agregado fino tienen aberturas que varían desde la malla N° 100 (150 micras) hasta 9,52 mm (Sánchez, 2014).

Desde hace varios años, conocer el tamaño de las partículas que componen un material se ha vuelto prioritario, en razón a la relación directa que tiene con sus propiedades, lo que incide directamente en su futuro uso para distintas aplicaciones. Los laboratorios de investigación y sectores industriales han profundizado en este campo, comenzando primero por el desarrollo de métodos de ensayo y de técnicas instrumentales propicias que posibilitaban el aumento en el conocimiento de la granulometría de una muestra, para posteriormente identificar las correlaciones entre su finura y su comportamiento fisicoquímico, de manera que se lograra seleccionar (tal como ocurre en el caso de la industria cementera) una óptima distribución granulométrica para una aplicación específica. Y como se dijo anteriormente, existe una estrecha relación entre la finura y la reactividad del material, lo que incide en las propiedades físicas y mecánicas del cemento (Frías, Luxan, & Sánchez, 1988).

La interpretación de un análisis granulométrico pueden ser generalizados y cuantificados a través de expresiones matemáticas denominadas “funciones de distribución de tamaño”, que relacionan el tamaño de partícula con un porcentaje en peso, por lo general, lo que se llama “el acumulado retenido o pasante”. La función de distribución Gates-Gaudin-Schumann (GGS) consiste en la expresión matemática de distribución de tamaños cuya ecuación es:

**Ecuación 1. Función de Distribución Gates-Gaudin-Schumann**

$$F(x) = 100 \left( \frac{x}{x_0} \right)^a \quad (1)$$

Dónde:

$F(x)$  = % en peso acumulado pasante por cada malla.

$x$  = Tamaño de partículas en micrones.



$x_0$ = Módulo de tamaño el cual indica el tamaño teórico máximo de partículas en la muestra

$a$ = Módulo de distribución (Cruzat, 2016)

Por su parte, la función de Rosin-Rammler (utilizada en el presente estudio), al principio se destinaba a la medición de las partículas del carbón y desde entonces ha sido empleada en muchos otros materiales (Allen, 2003). Se emplea para representar la distribución en peso (o masa) de la distribución de tamaños de partículas (Merkus, 2009). La distribución de Rosin-Rammler se formula a través de la siguiente ecuación (Cruzat, 2016):

**Ecuación 2. Función de Distribución de Rosin-Rammler**

$$F(x) = 100 \left\{ 1 - \exp \left[ - \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \right] \right\} \quad (2)$$

Dónde:

$F(x)$  = % acumulado pasante

$x_r$  = Módulo de tamaño

$m$  = Modulo de distribución

Esta ecuación se puede escribir también como:

$$F(x) = 100 - 100 \exp \left[ - \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \right] \quad (2.1)$$

$$100 - F(x) = 100 \exp \left[ - \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \right] \quad (2.2)$$

$$G(x) = 100 \exp \left[ - \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \right] \quad (2.3)$$

$$\frac{100}{G(x)} = \exp \left[ \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \right] \quad (2.4)$$

Aplicando logaritmo natural a ambos lados tenemos:

$$\ln \left[ \frac{100}{G_x} \right] = \left[ \frac{x}{x_r} \right]^m \quad (2.5)$$

Luego, aplicando logaritmo decimal a ambos lados, se obtiene:





$$\log \ln \left[ \frac{100}{G_x} \right] = m \log x - m \log x_r \quad (2.6)$$

Si se grafica el  $\log \ln \left[ \frac{100}{G_x} \right]$  vs  $\log x$  se obtendrá una línea recta de la forma:  $Y = A + BX$

Si hacemos:

$$Y = \log \ln \left[ \frac{100}{G_x} \right] \quad (2.7)$$

$$A = -m \log x_r \quad (2.8)$$

De donde se obtiene el valor de  $x_r$ :

$$x_r = 10^{\left( \frac{A}{-m} \right)} \quad (2.9)$$

$$B = m \quad (2.10)$$

$$X = \log x \quad (2.11)$$

$$\text{Luego: } Y = A + BX \quad (2.12)$$

Como el método es tedioso para graficar, existe un papel especial para hacer el gráfico de este modelo, llamado papel de Rosin – Rammler, en el cual se plotea directamente  $x$  y  $G(x)$ . En comparación con el método log-log de G.G.S, la gráfica de R-R agranda las regiones abajo del 25 % y arriba del 75 % del acumulativo de finos y se contrae en la región de 30 a 60 %. Sin embargo, se ha demostrado que esta contracción es insuficiente para causar efectos adversos. (Cruzat, 2016)

El presente estudio utiliza la granulometría láser que es un método rápido para determinar distribuciones de tamaños de partícula tanto en vía seca como en húmeda. Los primeros trabajos de aplicación de la técnica de difracción por rayos láser a los materiales utilizados en el sector de la construcción, se basaron en estudios sobre cementos. Junto a ellos surgieron también algunos trabajos que relacionaban las técnicas tradicionales de determinaciones granulométricas, con la técnica láser (Frías, Sánchez, Luxan, & García, 1990).

Los avances en la tecnología láser han permitido el desarrollo de múltiples aplicaciones, en concreto la espectrometría de difracción de rayos láser para la

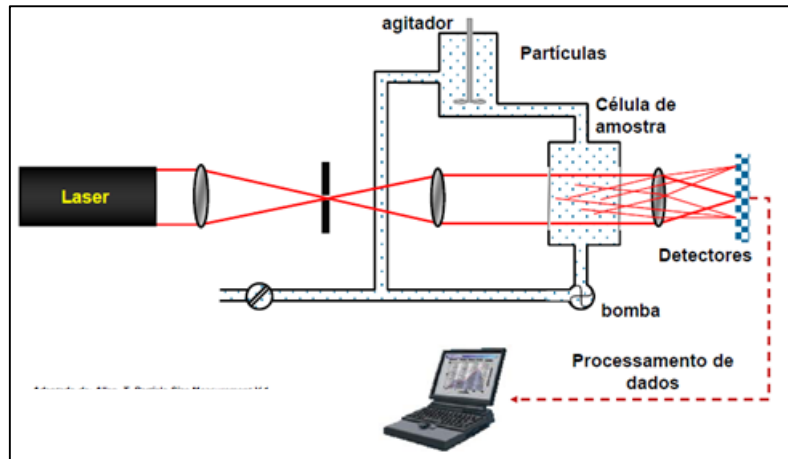


determinación de la curva de distribución del tamaño de partícula de diferentes materiales y permitir la obtención de la misma, tanto en seco como en húmedo.

Lo dificultoso que significaba determinar las características de los materiales, particularmente las partículas que lo constituyen y aspectos como el tamaño, distribución, morfología, etc., trajo consigo la investigación de distintos métodos y las respectivas técnicas instrumentales. En la actualidad, la tecnología láser ha logrado un gran protagonismo, pues permite obtener resultados con rapidez, precisión y reproducibilidad (Frías et al., 1988).

La técnica de difracción láser se basa en el principio que las partículas que pasan a través del haz dispersan la luz en un ángulo que está directamente relacionado con su tamaño: las partículas grandes, dispersan en ángulos bajos, mientras que las partículas pequeñas dispersan el haz laser en ángulos altos. El tamaño medible varía de 50 [nm] a 1000 [ $\mu$ m]. Suspensiones concentradas, del orden de 1,0 [% en peso] se preparan con el humectante adecuado y/o agentes dispersantes. Un pequeño tratamiento ultrasónico a veces es útil para romper los aglomerados no estructurados. Unos pocos mililitros de suspensión se requieren para llevar a cabo las mediciones. Este método es muy atractivo porque sólo requiere de unos pocos minutos para el análisis de la muestra. Las suspensiones se preparan por lo general en agua, pero otros disolventes también se pueden utilizar (etanol, isopropanol, o el octano). Es posible también llevar a cabo la medición de polvos secos mediante la adaptación de un equipo específico. Las limitaciones de este método aparecen en los tamaños pequeños ( $<1\mu$ m), en partículas no esféricas y en materiales con un bajo índice de refracción con respecto al medio dispersivo (Mazouzi, Kacimi, Cyr, & Clastres, 2014) (De Weerd et al., 2011). A continuación, a manera de gráfico, se presenta el principio de funcionamiento de la granulometría láser:

Figura 1. Principio de funcionamiento de granulometría



Fuente: (Allen, 2003)

Así también, es importante mencionar que se han realizado varias investigaciones utilizando granulometría láser, las que demuestran su efectividad en el análisis de distintos materiales. Por ejemplo, el estudio de Frías y Sánchez (2002) empleó el análisis granulométrico láser para cuantificar los contenidos totales y solubles de cromo, níquel y cobalto presentes en ciertos cementos, evidenciándose que los clínkeres son los principales responsables de la presencia de cromo soluble VI en los cementos comerciales. Otra investigación (Frías, Sánchez, Luxan, & García, 1990) aplica la granulometría láser al estudio de materiales puzolánicos en suspensión. Como principal resultado se obtuvo que, respecto a la elutriación, las diferencias de los valores medios de los tamaños de partícula encontradas en los materiales puzolánicos se ubican siempre por debajo de los valores obtenidos a través de la granulometría láser. El estudio de Trochez, Torres y Mejía (2010) analizó el efecto de la incorporación de un residuo industrial (conocido como craqueo catalítico usado o FCC) de una refinería de petróleo colombiana en el proceso de hidratación de pastas cementicias. Por medio de la granulometría láser se pudo determinar la reactividad puzolánica del material y la clase de productos de hidratación; resultando que el proceso de hidratación de pastas adicionadas con FCC es altamente exotérmico en razón de su actividad puzolánica a cortas edades.

En relación a los analizadores de tamaño de partículas por difracción láser, el Mastersizer 3000, proporciona distribuciones rápidas y precisas, tanto para dispersiones húmedas como secas, y con el mínimo de esfuerzo, utilizando la técnica de difracción



de láser para medir el tamaño de las partículas. Este instrumento se compone de tres elementos principales:

- Banco óptico: Una muestra dispersada pasa a través de la zona de medición del banco óptico, donde un haz de láser ilumina las partículas. Una serie de detectores miden con precisión la intensidad de la luz dispersada por las partículas dentro de la muestra para ambas longitudes (onda de luz roja y azul) y en un amplio intervalo de ángulos.
- Las unidades de muestra de dispersión (accesorios): La dispersión de muestra es controlada por una serie de unidades de dispersión húmeda y seca. Con ello se garantiza que las partículas son enviadas a la zona de medición del banco óptico con la concentración correcta y en un estado adecuado y estable de dispersión.
- Software: El software Mastersizer 3000 controla el sistema durante el proceso de medición y análisis de los datos de dispersión para calcular una distribución de tamaño de partícula. También proporciona información instantánea durante el desarrollo de métodos y consejos de expertos sobre la calidad de los resultados (De Weerd et al., 2011) (Mazouzi et al., 2014).

Entre las ventajas del Mastersizer con respecto a otros sistemas de análisis granulométrico están: a) Poseer un rango de medida más amplio (de 10nm a 3,5mm), así como una resolución a nivel submicrónico; b) Una eficiente e inmediata dispersión de polvo seco, que abarca desde polvos frágiles a gruesos abrasivos; c) su precisión y reproducibilidad, ya que la velocidad de adquisición de datos de 10KHz aumenta el muestreo; d) Tener una presentación de resultados al gusto del operador (Fyten, Luke, & Rispler, 2007).

Un complemento importante al análisis de la medida de tamaño realizado por los sistemas de difracción láser es la resistencia de los materiales. La resistencia de un material consiste en su capacidad para resistir esfuerzos sin fallar (Solís, Moreno, & Arcudia, 2008). La resistencia a la compresión consiste en el indicador de la fortaleza del material, además de ser una propiedad relacionada con la mayoría de las otras características del cemento (resistencia al esfuerzo cortante, módulo de elasticidad, permeabilidad) (Solís et al., 2008).



A su vez, la resistencia mecánica del cemento endurecido consiste en la propiedad material que acaso resulta más obvia entre los requisitos para sus usos estructurales, de ahí que las pruebas de resistencia sean exigidas en todas las especificaciones del cemento. El modo más lógico de medir la resistencia mecánica es, posiblemente, sobre probetas hechos con pasta, pues de este modo se limita la dispersión que aparece en los resultados cuando se emplean probetas de mortero o concreto; no obstante, varias investigaciones han demostrado que el comportamiento mecánico de varios cementos varía al ensayarlos en probetas con agregados y, por ello, la determinación de resistencia mecánica sobre probetas de pasta es muy poco útil. Ello lleva a pensar que la resistencia mecánica debe ser medida sobre probetas de concreto, aunque el tamaño relativamente grande de las muestras y lo difícil que es conseguir agregados gruesos normalizados ha llevado a que en ningún país se emplee ensayos sobre muestras de concreto para calificar los cementos. (Sánchez D. , 2001).

En relación a las propiedades de la pasta y con el fin de aumentar la resistencia mecánica del cemento se busca la máxima finura; sin embargo se ha demostrado que ocurre una reducción de la resistencia a los agentes agresivos cuando se aumenta el grado de finura de molido del cemento. Así, señalan Bilurbina & Liesa (2000), que si un cemento Portland, pretende ser resistente a los agentes agresivos no poseerá una finura de molido excesiva, pues el aumento del agua de amasado perjudica la compacidad del hormigón fraguado.

La resistencia mecánica posee dos valores característicos: la resistencia a tracción y la resistencia a compresión, las que dependen de la cantidad de cemento utilizada, de su composición, como del tipo de árido empleado y de otros factores. (Bilurbina & Liesa, 2000).

El valor de la resistencia a la compresión del cemento es influenciado, en gran medida, por los procedimientos y las condiciones de ensayo; así, diferentes países han adoptado diferentes procedimientos de prueba para determinar la resistencia a la compresión del cemento. El valor de resistencia a la compresión es muchas veces influenciado por variaciones menores en el procedimiento:



- La proporción de la mezcla de morteros y la relación agua / cemento son de los principales factores de los que depende el valor de la resistencia a la compresión del cemento.
- La clasificación de la arena utilizada en morteros para pruebas estándar tiene un efecto significativo sobre el valor de resistencia a la compresión del cemento. En algunas normas se utiliza una arena de tamaño uniforme.
- El método de mezclado y compactación.
- La forma y tamaño de las muestras (Farkas, Grace, & Klieger, 1986) (Chandigarh, 2006).

A raíz de lo expuesto anteriormente y gracias a la colaboración de la Compañía Industrias Guapán, en este trabajo se pretende estudiar la distribución del tamaño de partículas de cemento analizadas por el método de granulometría laser y su correlación con las propiedades mecánicas, en especial las resistencias a la compresión.

### **Hipótesis**

**Hipótesis 1:** Las distribuciones del tamaño de partículas de cemento analizadas por el método de granulometría laser tienen correlación con la propiedad de resistencias mecánicas a la compresión.

**Hipótesis 2:** La modificación de las velocidades de operación del molino de cemento separador de aire y variador de velocidad (G35, G39) están correlacionadas con la resistencia a la compresión.

### **Materiales y métodos**

#### **Materiales**

Los materiales empleados en el presente estudio agrupan a los siguientes elementos:

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 1. Probeta de vidrio de 500 ml | 4. Cemento portland puzolánico |
| 2. Espátula                    | 5. Moldes para especímenes     |
| 3. Arena graduada normalizada  | 6. Tazón                       |



- |                              |                    |
|------------------------------|--------------------|
| 7. Paleta                    | 10. Cuchara        |
| 8. Fundas plásticas          | 11. Agua destilada |
| 9. Balde para tomar muestras |                    |

### Recopilación de datos

La piedra caliza atraviesa un proceso de molienda de crudo, calcinación y la molienda de cemento, antes del envasar el producto final. Es de especial interés en el proceso de molienda del cemento que, al realizar micro-variaciones en el tamaño de la partícula, se podría modificar la resistencia del producto final. El control en este punto, se realiza efectuando análisis granulométrico.

Es por ello, que en este proyecto, se ha diseñado un muestreo granulométrico en función de dos controles específicos como son: separador de aire y el variador de velocidad. Para ello, el personal a cargo de la operación en Cementos Guapán S.A., con el conocimiento de los ingenieros del Departamento de Innovación y Desarrollo UCEM-CEM, Alfredo Mora y Sebastián Puga (2016) y la tesis de grado realizada por Andrés Bermeo (2014), acordaron las velocidades mínimas y máximas estandarizadas que pueden ser empleadas en el separador de aire y en el variador de velocidad.

El personal de operación aceptó modificar las variables de operación del molino de cemento para comprobar si la fineza del mismo, bajo los estándares normalizados, podría afectar la resistencia a la compresión. Por lo anterior, se diseñaron en total veinte y ocho muestras, producto de cuatro velocidades empleadas en el separador de aire y siete variaciones en el variador de velocidad, mismas que se ilustran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Velocidades de G35 Y G39 empleadas en el experimento

		Separador de Aire (G35) RPM*			
		66%= 190,21 (a)	68%= 195,97 (b)	70%= 201,74 (c)	72%= 207,504 (d)
v. de velocidad (G39) RPM*	86% = 1025,98 (s)	C1as	C8bs	C15cs	C22ds
	88% = 1049,84 (t)	C2at	C9bt	C16ct	C23dt
	90% = 1073,7 (q)	C3aq	C10bq	C17cq	C24dq
	92% = 1097,56 (v)	C4av	C11bv	C18cv	C25dv
	94% = 1121,42 (w)	C5aw	C12bw	C19cw	C26dw
	96% = 1145,28 (y)	C6ay	C13by	C20cy	C27dy
	98% = 1169,14 (z)	C7az	C14bz	C21cz	C28dz

Fuente: Bermeo (2014) y Mora y Puga (2016) \*RPM (Revoluciones por minuto)

La modificación de G35 y G39 están dentro del marco de estándares exigidos a la empresa Cementos Guapán S.A y estas son 66, 68, 70 y 72%, y en 86, 88, 90, 92, 94,



96 y 98%, para G35 y G39 respectivamente. Estos porcentajes también equivalen a valores mínimos de 190,21 RPM y máximos de 207,504 RPM en G35, así como a 1025,98 RPM mínimas y máximas de 1169,14 RPM en G39. Cada una de las 28 combinaciones (C1a – C28d) de G39 con G35 arrojó una muestra que fue recogida a veinte minutos posteriores a la molienda del cemento, cada una en un día diferente, ocupando un total de 28 días.

Las muestras se recogieron en un envase de funda plástica, cuyo contenido fue de 2.000 g aproximadamente.

### **Tratamiento de variables**

Una vez que se dispuso de cada muestra, se procedió a dos tipos de tratamientos de variables. Por un lado, se realizó la evaluación granulométrica en un granulómetro láser Masterizer 3000, El cual trabaja a través de difracción láser proporcionando distribuciones de tamaño de partículas rápidas y precisas. Este aparato, mide gamas de tamaños de partículas desde nanométricas a milimétricas, cuenta con un rendimiento excepcional en el tamaño de superficie y proporciona mediciones computarizadas que ofrece el software del equipo (Malvern, 2016). Y por otro lado, se evaluó la resistencia mecánica del producto mediante una Máquina Universal de ensayos mecánicos, que permite la realización de ensayos estáticos convencionales de compresión, tracción y flexión desde -50 hasta 250 °C, con una capacidad máxima de carga de 10000 Kg (10 t) y con software propio de gestión de ensayo y adquisición de datos (UPC, 2016).

### **Análisis granulométrico**

La evaluación con el granulómetro láser consistió en un ensayo de granulometría para cada muestra, utilizando una cantidad de 2 gramos (g) para cada ensayo. La granulometría láser evaluó el tamaño en micras ( $\mu\text{m}$ ) desde un mínimo de 0,01  $\mu\text{m}$  hasta un máximo de 3.080,00  $\mu\text{m}$  conforme los cuales se ha organizado el porcentaje de volumen de concentración obtenido para cada muestra. Este proceso permite obtener la distribución del tamaño de las partículas de cemento y posteriormente esta distribución de partículas ha sido evaluada con la función de Rosin-Rammler.

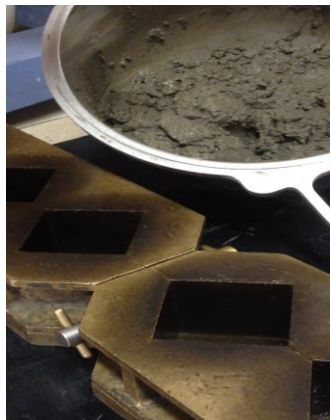
### **Análisis de resistencia mecánica**





Para la realización de ensayos de resistencia mecánica a la compresión en el cemento se utilizó la norma NTE INEN 488:2009, la cual, entre otros aspectos, consiste en combinar 740g de cemento muestra, 2035g de arena normalizada y 390 mililitros (ml) aproximadamente de agua destilada, conforme la tabla de flujo de la norma NTE INEN 2502:2009. Posteriormente la mezcla se coloca en nueve moldes metálicos de 25mm de espesor, una vez llenados los cubos son trasladados a la cámara húmeda en donde serán expuestos durante 24 horas a aire húmedo, para posteriormente proceder a la rotura en los días 1, 3, 7 y 28, para esto se utilizó la Máquina Universal arrojando resistencias mecánicas en megapascuales (Mpa).

Figura 2. Ensayo de resistencia mecánica



Fuente: Cementos Guapán

A continuación se exponen los resultados del cálculo de la tabla de flujo correspondientes a la Muestra 19 y a la Muestra 13, cuyo ensayo se ha realizado de acuerdo a la norma NTE INEN 2502:2009, la cual consiste básicamente en colocar una capa de aproximadamente 25 mm de mezcla (agua destilada, arena normalizada y cemento) dentro del molde que este sobre el centro de la mesa de flujo previamente normalizada, compactamos 20 veces con el compactador, para de esta forma asegurar un llenado uniforme, posteriormente llenamos el molde con mortero y realizamos el mismo procedimiento nivelando y compactando adecuadamente el mortero. Terminada la operación del llenado dejamos transcurrir un minuto para levantar el molde de flujo e inmediatamente dejamos caer la mesa 25 veces en 15 segundos; procedemos entonces a medir con el calibrador el diámetro del mortero a lo largo de las cuatro líneas trazadas en la superficie de la mesa. El resultado del flujo es la suma de dichos diámetros, que deberá estar entre 110 a 115 mm para poder continuar con el ensayo de resistencias a la



compresión, de no ser así se debe realizar una nueva mezcla con una cantidad de agua diferente hasta que el flujo este dentro de los valores permitidos.

**Tabla 2.** *Calculo de la tabla de flujo en morteros*

Muestra C19cw		Muestra C13by	
Cantidad de agua: 385ml		Cantidad de agua: 387ml	
Diámetro 1 (mm)	28	Diámetro 1 (mm)	30
Diámetro 2 (mm)	26	Diámetro 2 (mm)	27
Diámetro 3 (mm)	32	Diámetro 3 (mm)	31
Diámetro 4 (mm)	26,5	Diámetro 4 (mm)	26
<b>Sumatoria Diámetros</b>	<b>112,5 mm</b>	<b>Sumatoria Diámetros</b>	<b>114 mm</b>

Fuente: El autor.

Del mismo modo, se presentan los valores obtenidos de la tabla de flujo para las 28 muestras.

**Tabla 3.** *Resultados de Tabla de Flujos*

Muestra	T. flujo	Muestra	T. flujo	Muestra	T. flujo	Muestra	T. flujo
C1as	390	C8bs	387	C15cs	389	C22ds	388
C2at	393	C9bt	391	C16ct	387	C23dt	390
C3aq	389	C10bq	391	C17cq	394	C24dq	391
C4av	392	C11bv	386	C18cv	389	C25dv	393
C5aw	387	C12bw	388	C19cw	385	C26dw	392
C6ay	385	C13by	387	C20cy	387	C27dy	388
C7az	390	C14bz	387	C21cz	386	C28dz	385

Fuente: El autor

### Método de análisis estadístico

Las variables para cada una de las combinaciones han sido procesadas en el software estadístico SPSS 22 (IBM). Las variables correspondientes a las distribuciones del tamaño de partículas de cemento se expresan en el módulo de tamaño o tamaño representativo de la muestra (Tabla 4). Este cálculo se efectuó utilizando la calculadora Cal Conver (Doll, 2014).

Por su parte, la modificación de las variables de operación del molino de cemento separador de aire y variador de velocidad (G35 y G39) se presentan con el producto obtenido de multiplicar los porcentajes de velocidades que se expresa en %G5 (G39). A las tres variables señaladas se las correlaciona con la resistencia mecánica para los



cuatro días respectivos utilizando la prueba paramétrica denominada Coeficiente de correlación de Pearson. El nivel de significancia establecido es de 0,05.

## Resultados

### Rosin Rammler (R-R)

Los valores del tamaño representativo de las muestras fueron obtenidos a partir de la distribución que ofrece el granulometro Masterizer 3000. Estos valores fueron ingresados en la calculadora automática Cal Conver cuya notación en programación se expresa de la siguiente manera:

step 0	$R = \exp(-(D/D_N)^n)$
step 1	$\ln(R) = -(D/D_N)^n$
step 2	$\ln(1/R) = (D/D_N)^n$
step 3	$\ln[\ln(1/R)] = n \cdot \ln(D/D_N)$
step 4	$\ln[\ln(1/R)] = n \cdot \ln(D) - n \cdot \ln(D_N)$

Dónde:

**R** es el porcentaje acumulado retenido en un tamaño **D**

**D<sub>N</sub>** y **n** son parámetros de ajuste

Por su parte, de acuerdo a la calculadora utilizada de la intersección de los ejes se obtuvo  $XY = n \cdot \ln(D_N)$ , mientras que el exponente fue  $m = \exp(-n \cdot \ln(D_N)/n)$ .

Tanto la pendiente como la intersección se han obtenido para cada una de las 28 muestras. Arrojando como resultado 28 valores para cada una de las ecuaciones cuyos resultados se expresan en la Tabla 4.

### Correlación

La ecuación para calcular **r** de Pearson se realizó con los puntajes **z**, de la siguiente manera:

#### Ecuación 3. Coeficiente **r** de Pearson

$$r = \frac{\sum Zx^z y}{N - 1}$$



Dónde:

$\sum Zx^z y$  es la suma de los productos de cada pareja de puntajes  $z$ . Es decir, se requiere de valore  $z$  para cada dato en bruto.

Por su parte, la correlación ha sido realizada de manera general en parejas de datos para el exponente y la resistencia mecánica de cada día, así como para el producto obtenido de multiplicar los porcentajes de velocidades que se expresa en %G5 (G39) con la resistencia mecánica. Obteniendo, de esta manera dos valores de Correlación.

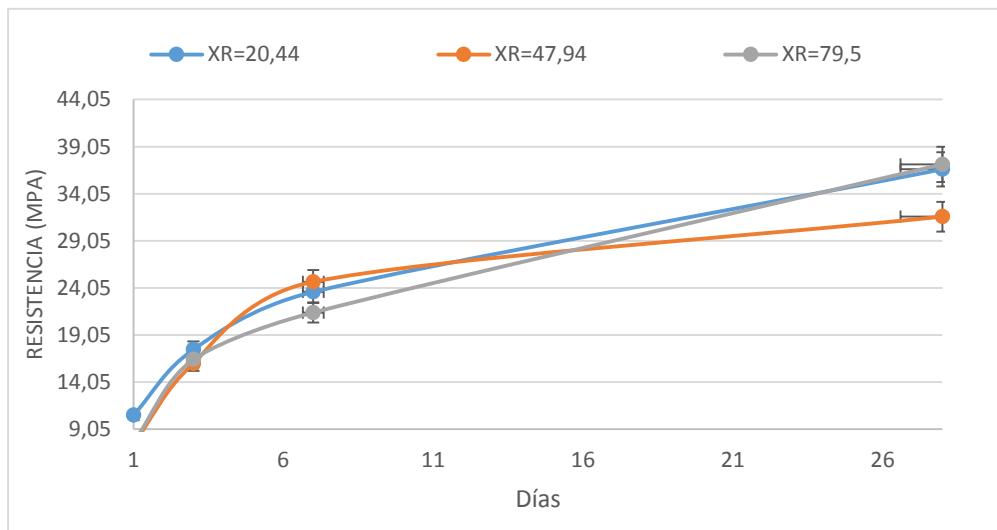
**Tabla 4.** Resultados obtenidos para cada muestra

ID	Muestra	%(%G35) * (%G39)	ROSSIN RAMLER R-R			RESISTENCIA (Mpa)			
			Pend.	Inter.	x <sub>r</sub> (μm)	1dia	3dias	7dias	28dias
1	C1as	56,76	1,34	-4,06	20,66	12,31	23,7	25,88	36,74
2	C2at	58,08	1,93	-5,49	17,23	10,03	18,74	28,07	32,98
3	C3aq	59,4	1,34	-4,06	20,89	6,86	16,66	21,69	32,45
4	C4av	60,72	1,3	-3,92	20,44	10,54	17,5	23,62	36,4
5	C5aw	62,04	1,36	-4,17	21,44	8	13,7	15,93	30,15
6	C6ay	63,36	1,71	-3,65	8,44	7,17	13,13	20,26	34,07
7	C7az	64,68	1,35	-4,11	21,18	8,19	17,13	21,01	33,17
8	C8bs	58,48	0,62	-2,3	40,41	9,05	16,7	23,43	33,09
9	C9bt	59,84	1,27	-4,07	24,36	6,47	16,45	22,44	35
10	C10bq	61,2	1,33	-4,23	23,96	7,56	14,88	20,22	29,64
11	C11bv	62,56	1,32	-4,03	21,44	9,21	18,6	30,52	46,01
12	C12bw	63,92	1,14	-3,84	28,85	8,23	17,62	22,47	38,43
13	C13by	65,28	1,29	-3,98	21,93	7,29	14,8	21,56	31,83
14	C14bz	66,64	1,29	-4,07	23,57	9,12	17	23,5	33,77
15	C15cs	60,2	0,76	-3,4	89,97	9,96	17,82	25,63	36,43
16	C16ct	61,6	1,26	-3,86	21,14	8,35	17,9	21,3	30,52
17	C17cq	63	0,76	-3,31	79,5	7,64	16,45	21,43	37,17
18	C18cv	64,4	0,95	-3,68	47,94	7,49	16,03	24,7	31,62
19	C19cw	65,8	1,32	-4,11	22,62	8,07	15,54	25,03	37,45
20	C20cy	67,2	1,27	-3,89	21,25	9,7	19,6	24,5	35,7
21	C21cz	68,6	1,23	-3,92	24,27	7	16,1	21,7	37,1
22	C22ds	61,92	1,33	-4,08	21,35	8,2	16,9	22,5	34,7
23	C23dt	63,36	1,29	-3,92	20,97	8,2	16,9	22,3	36,6
24	C24dq	64,8	0,77	-3,37	79,7	7,6	16,6	20,6	36,3
25	C25dv	66,24	0,79	-3,41	74,37	8,6	16	20,5	34,4
26	C26dw	67,68	0,91	-3,59	51,15	7,8	16,3	23,3	35
27	C27dy	69,12	1,36	-4,02	19,07	10,2	18,1	25,6	39,9
28	C28dz	70,56	1,31	-4,15	23,79	9,4	22,3	36,1	48,3

Fuente: El autor

A continuación se ilustra dos ejemplos en los cuales se puede observar la variación de la resistencia (Mpa) con el tiempo (1, 3, 5, 7 y 28 días) analizados sus exponentes en R-R (xr) o tamaños representativos de muestras escogidas al azar, las cuales son expresadas en  $\mu\text{m}$ . En todos ellos se advierte crecimiento de acuerdo a los días de secado del material, sin embargo, de acuerdo a las barras de error al 5%, no se advierten diferencias entre dichos módulos de tamaño, quedando demostrado de esta manera que no existe correlación entre la resistencia a la compresión y el tamaño representativo de la muestra.

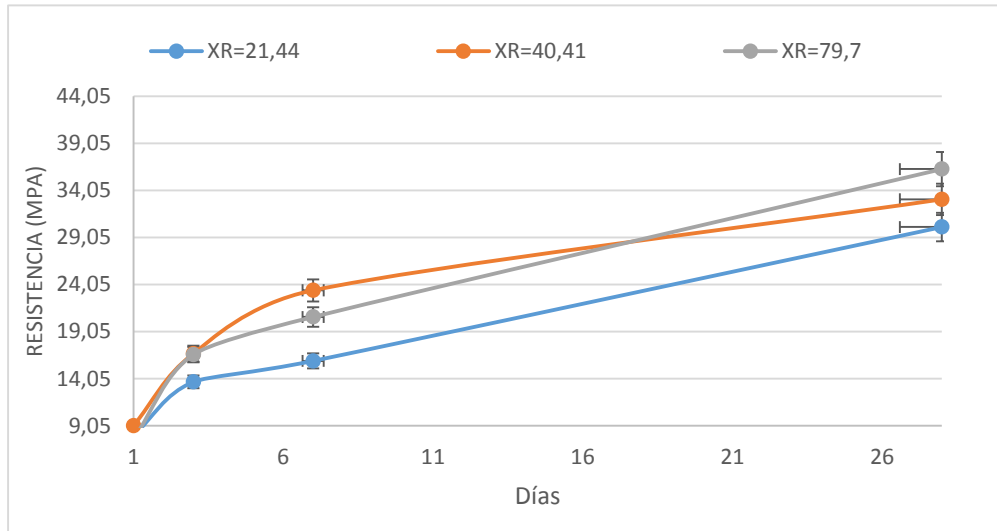
Figura 3. Resistencia en MPA de acuerdo a XR Muestras C4a, C18c y C17c



Fuente: El autor

La muestra C4a pertenece a la curva  $xr=20,44$ , la muestra C18c pertenece a la curva  $xr=47,94$  y la muestra C17c pertenece a la curva  $xr=79,5$ .

Figura 4. Resistencia en MPA de acuerdo a XR Muestras C5a, C8b y C24d



Fuente: El autor

La muestra C5a pertenece a la curva  $xr=21,44$ , la muestra C8b pertenece a la curva  $xr=40,41$  y la muestra C24c pertenece a la curva  $xr=79,7$ .

Al realizar una correlación entre el exponente, obtenido de la pendiente e intersección, con la resistencia del cemento a la compresión no se encontró una correlación en ninguno de los cuatro días de medición. Aunque existe una tendencia en los cementos de tamaños menores a 40  $\mu m$  a tener una resistencia menor a los 28 días, dependiendo el caso. Esto puede atribuirse a que los cementos con granos más pequeños son menos resistentes a los ataques químicos, debido a la cantidad de agua que absorben, como lo exponen Bilurbina & Liesa (2000). Ya que el aumento del agua de amasado perjudica la compacidad del hormigón fraguado y podríamos razonar que esta relación también hace que el crecimiento cristalino sea segregado.

En lo que respecta a la hipótesis de la variación de las velocidades se encontró que éstas no guardan correlación con los días 1, 3 y 7. Sin embargo, sí lo hacen con el día 28 (sig.  $<0,05$ ). Ello se demuestra en una correlación media (0,394), según la cual, a mayor porcentaje de velocidades G35 y G39, mayor es la resistencia del cemento.

**Tabla 5.** Correlación entre tamaño de partículas y velocidad de operación del molino con la resistencia del cemento

		Día 1	Día 3	Día 7	Día 28
xr (Tamaño representativo de la muestra)	Correlación de Pearson	-,059	-,077	-,103	,013
	Sig. (bilateral)	,764	,696	,601	,947
	N	28	28	28	28
Porcentaje producto de (%G35)*(%G39)	Correlación de Pearson	-,186	-,056	,179	,394*
	Sig. (bilateral)	,343	,779	,362	,038
	N	28	28	28	28

\*Correlación significativa

Fuente: El autor

### Discusión

Con respecto a las hipótesis formuladas en el presente estudio podemos decir lo siguiente. La hipótesis que señala que las distribuciones del tamaño de partículas de cemento analizadas por el método de granulometría laser tienen correlación con la propiedad de resistencias mecánicas a la compresión, no queda demostrada en este tipo de investigación, pero no se puede descartar que con un mejor análisis y distribución de los tamaños arrojen una tendencia. Esto significa que los valores obtenidos por R-R no mostraron correlación con la resistencia en Mpa a los diferentes días. No obstante, se evidencia en algunos ejemplos aislados (Fig. 3 y 4) que efectivamente cuando el tamaño de partículas es mayor la resistencia también lo es y esto puede estar relacionado con las propiedades químicas del crecimiento cristalino de los cementos, que no están considerados en este trabajo. Sin embargo, en conjunto, todas las 28 muestras no muestran correlación significativa con las propiedades mecánicas, de hecho el valor de la correlación equivale a 0,013 ( $p > 0,05$ ). Las ventajas señaladas por Fyten, Luke, & Rispler (2007), respecto al medidor de partículas Mastersizer, no han ofrecido un resultado de estas muestras conforme la hipótesis aquí formulada.

Por su parte, la segunda hipótesis formulada en el estudio y que sí se verifica tiene relación con las velocidades del molino y dice que la modificación de las velocidades de operación del molino de cemento (G35 y G39) están correlacionadas con la resistencia a la compresión. La modificación de las velocidades por separado muestra correlación





pues, a mayor velocidad del separador de aire y del variador de velocidad, mayores son las propiedades mecánicas. Para obtener una sola medida, se ha correlacionado el promedio de las dos velocidades y se ha encontrado una correspondencia de 0,394 ( $p < 0,05$ ). Ello significa que, durante la molienda del cemento las fracciones más finas del producto han sido mejor enriquecidas con los componentes de molienda (Labahn & Kohlhaas, 1985). En este caso, a mayor velocidad del separador de aire muestran mayor dispersión de partículas por aire, mientras que, el variador de velocidad ha generado mayor caída de material grueso (Chiriboga, 2012).

### **Conclusiones**

No se encontró correlación significativa entre el tamaño de partículas de cemento analizadas por el método de granulometría laser en micras y las propiedades mecánicas en Mpa (Correlación de Pearson 0,013). Sólo en casos particulares que se han ilustrado, se encontró que los exponentes de Rossin Rammler muestran valores de resistencia mecánica bajos.

La modificación de las velocidades de operación del molino de cemento en G35 y G39 promediadas, están asociadas con la resistencia a la compresión del producto, la correlación que se encontró fue significativa (Correlación de Pearson (0,394).

Se recomienda el análisis de la distribución del tamaño de las partículas de cemento considerando las propiedades químicas del material en cada parte del proceso de fabricación ya que ello influye directamente en la resistencia del material, siendo esto un limitante en nuestro estudio.



## Bibliografía

- Allen, T. (2003). Powder sampling and Particle Size Determination. London (Gran Bretaña): Elsevier.
- Antuña, J. (2009). Léxico de la construcción. Madrid (España): CSIC.
- Bermeo, A. (2014). Análisis de variables que inciden en el proceso de molienda y secado para mejorar la superficie específica del cemento portland. Cuenca (España): Universidad de Cuenca (Tesis de pregrado).
- Bilurbina, L., & Liesa, F. (2000). Materiales no metálicos resistentes a la corrosión. Barcelona (España): Marcombo Boixareu editores.
- Carrasco, M., Bonavetti, V., Menéndez, E., & Irassar, E. (2005). Cementos a medida con material calcáreo y escoria granulada de alto horno. Revista de Construcción Vol. 4 N° 1, IV (1), 24-34. Recuperado de [http://www7.uc.cl/ccivil\\_revista/revista/Rev\\_6/\\_REVISTA\\_N6\\_FULL.pdf#page=25](http://www7.uc.cl/ccivil_revista/revista/Rev_6/_REVISTA_N6_FULL.pdf#page=25)
- Castells, X. (2000). Reciclaje de residuos industriales: aplicación a la fabricación de materiales de construcción. Madrid (España): Díaz de Santos.
- Chandigarh, T. (2006). Civil Engineering Materials. Delhi (India): Tata McGraw-Hill.
- Cruzat, E. (2016). Desarrollo tecnológico para la mejora continua de procesos de producción. Minería Chilena, páginas de Negocios e Industria.
- De Weerd, K., Haha, M. Ben, Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., & Lothenbach, B. (2011). Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research, 41(3), páginas 279–291. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.014>
- Delgado, A., & Negrete, C. (2012). Evaluación del uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento Portland puzolánico Tipo IP. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2389/1/tq864.pdf>



- Díaz, J., Izquierdo, S., Mejía, R., & Gordillo, M. (2013). Mezcla ternaria de cemento portland, escoria de alto horno y piedra caliza: Resistencia mecánica y durabilidad. *Revista de La Construcción*, 12(3), 53–60. Recuperado de [http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X20130003000006&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X20130003000006&script=sci_arttext)
- Doll, A. (14 de Junio de 2014). Sagmilling. Obtenido de Fitting Rosin-Rammler parameters to a sieve analysis: Recuperado de <https://www.sagmilling.com/articles/2/view/?s=1>
- Empresa Pública Cementera. (2016). Unión Cementera Nacional, UCEM C.E.M. Recuperado de <http://www.cemento.gob.ec/p/productos-servicios/union-cementera-nacional/>
- Farkas, E., Grace, W., & Klieger, P. (1986). Uniformity of cement strenght. Philadelphia: ASTM. Páginas 1-11.
- Frías, M., & Sánchez, M. (Enero/Febrero/Marzo de 2002). Evolución y cuantificación de los sensibilizadores más importantes en los cementos portland comerciales. *Revista de Materiales de Construcción*, LII(265), 57-64. Recuperado de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/35859/1/392.pdf>
- Frías, M., Luxan, M., & Sánchez, M. (1988). Espectrometría de difracción por rayos láser. *Materiales de Construcción*, 38(212), 37–52. Recuperado de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/download/782/839>
- Frías, M., Sánchez, I., Luxan, M., & García, N. (1990). Granulometría láser : Estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos Láser granulometry. *Materiales de Construcción*, vol. 40 nº 217, páginas 39–52.
- Fyten, G., Luke, K., & Rispler, K. (Diciembre de 2007). Cementitions compositions containing interground cement clinker and zeolite. Recuperado de <https://www.google.com/patents/US7303015>



- Gambhir, M.L. (2013). Concrete Techonology. Ed. Tata McGraw-Hill Education, New Delhi (India), 658 pág.
- García, M., Sánchez, I., Frías, M., & Mújika, R. (2006). Comportamiento científico-técnico de los cementos de Portland elaborados con catalizador FCC. Madrid (España): CSIC.
- Industrias Guapán. (2016). Cemento. Recuperado de <http://www.industriasguapan.com.ec/producto/cemento/1>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). Manufactura, ingeniería y tecnología. México D.F.: Prentice Hall. 5ª edición
- Labahn, O., & Kohlhaas, B. (1985). Prontuario del cemento. Barcelona (España): Editores Técnicos Asociados.
- Lesley, R. (1898). History of the Portland Cement Industry in the United States. Recuperado de [http://doi.org/10.1016/S0016-0032\(98\)90048-5](http://doi.org/10.1016/S0016-0032(98)90048-5)
- Malvern. (2016). Gama de productos. Obtenido de Mastersizer 3000: Tamaño de Partícula Inteligente: Recuperado de <http://www.malvern.com/es/products/product-range/mastersizer-range/mastersizer-3000/>
- Mazouzi, W., Kacimi, L., Cyr, M., & Clastres, P. (2014). Properties of low temperature belite cements made from aluminosilicate wastes by hydrothermal method. Cement and Concrete Composites, 53, 170–177. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.001>
- Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2006). Ternary blended cement concrete. Part 1: Early age properties and mechanical strength. Materiales De Construcción, vol. 56, nº 284, pág. 55–67. Recuperado de <Go to ISI>://WOS:000242903800006
- Merkus, H. (2009). Particle size measurements: Fundamentals, practice, quality. The Netherlands: Springer.



- Mora, A., & Puga, S. (Febrero de 5 de 2016). Medidas autorizadas en G35 y G39 por el Departamento de Innovación y Desarrollo UCEM-CEM. (C. Muñoz, Entrevistador)
- PCA. (2012). How cement is made. Recuperado el 1 de <http://www.cement.org/cement-concrete-basics/how-cement-is-made>
- Punmia, B., Kumar, A., & Kumar, A. (2007). Limit State Design of Reinforced Concrete. New Delhi: Laxmi Publications.
- Ruiz, J. (2009). Proyecto de Factibilidad para el uso de Residuos Pétreos de la Construcción en el Proceso de Molienda de Cemento en la Compañía Industrias Guapán S.A. Universidad del Azuay. Facultad de Ciencia y Tecnología, Recuperado de <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/2207/1/09669.PDF>
- Sánchez, D. (2001). Tecnología del concreto y el mortero. Bogotá (Colombia): Bhandar editores.
- Sánchez, N. (2014). Granulometría de suelos. Recuperado de <http://civilgeeks.com/2013/11/25/granulometria-suelos-ing-nestor-luis-sanchez/>
- Santamaría, F. S. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción \*. Materiales de Construcción, N° 190-191, 69–84. <http://doi.org/10.3989/mc.1983.v33.i190-191.974>
- Solís, R., Moreno, E., & Arcudia, C. (2008). Study of the concrete ' s compressive strength due to the combined effect of the water-cement ratio , the coarse-fine aggregate ratio and the source of the aggregates Estudio de la resistencia del concreto por el efecto combinado de la relación agua-cemen. Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 31(3), 213–224. Retrieved from <http://www.scielo.org.ve/pdf/rtfiuz/v31n3/art02.pdf>
- Trochez, J. J., Agredo, J. T., & de Gutiérrez, R. M. (2010). Estudio de la hidratación de pastas de cemento adicionadas con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) de una refinería Colombiana. Revista Facultad de Ingeniería, (55), 26–34.
- Trujillo, J. (2014). Pastas, morteros, adhesivos y hormigones. Bogotá (Colombia): IC.



UPC. (28 de Septiembre de 2016). Equipos. Obtenido de Máquina universal de ensayos mecánicos: <http://www.upc.edu/sct/es/equip/518/maquina-universal-ensayos-mecanicos.html>